

ПАКЕТ «ДИНАМИКА» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЯДАМИ ВОЛЬТЕРРА

С.В. Солодуша

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск

В данной работе представлен программный комплекс «Динамика», предназначенный для идентификации и моделирования нелинейных динамических систем типа «вход-выход». Расчетные модули включают блоки идентификации, моделирования и адаптивного управления. Алгоритмы идентификации базируются на применении откликов эталонных систем на физически реализуемые обучающие входные сигналы. В качестве эталонных рассмотрены математические модели элемента теплообменного аппарата и ветроэнергетической установки с горизонтальной осью вращения. Приведены результаты расчетов, иллюстрирующие повышение точности моделирования за счет более полного учета информации об откликах системы на тестовые воздействия.

Ключевые слова: нелинейная динамическая система, полином Вольтерра, идентификация, автоматическое управление.

Введение

Для решения проблем описания функционирования динамических систем разработано довольно много методов [1–4]. Универсальный аппарат интегро-степенных рядов Вольтерра [5] хорошо известен в теории математического моделирования нелинейных систем в условиях априорной неопределенности и применяется при описании динамики различных технических систем (см., например, [6, 7]).

Для построения интегральной модели

$$y(\tau) = \sum_{m=1}^N \sum_{1 \leq i_1 \leq \dots \leq i_m \leq p} \int_0^\tau \dots \int_0^\tau K_{i_1 \dots i_m}(\tau, s_1, \dots, s_m) \prod_{k=1}^m x_{i_k}(s_k) ds_k, \quad \tau \in [0, T], \quad (1)$$

дающей представление отклика $y(\tau)$ на векторное входное возмущение $x(\tau)$, требуется восстановить многомерные характеристики нелинейной динамической системы $K_{i_1 \dots i_m}$. Ядра Вольтерра $K_{i_1 \dots i_m}$ в (1), называемые многомерными передаточными функциями, симметричны лишь по переменным s_1, \dots, s_m , которые соответствуют совпадающим индексам.

Для решения проблемы идентификации во временной области применяются различные подходы, в том числе рекурсивный метод наименьших квадратов [8] и нейронные сети [9].

Переходные процессы энергетических объектов обычно характеризуются высокой скоростью изменения параметров, что приводит к поиску компромисса между точностью моделирования и быстродействием алгоритмов. В связи с этим особое внимание уделяется построению быстродействующих моделей, хорошо описывающих динамические свойства энергетических объектов. Подробная (эталонная) математическая модель используется при этом для настройки (идентификации) переходных характеристик. В данной работе описан программный комплекс «Динамика», предназначенный для моделирования переходных и установившихся режимов некоторых систем тепло- и электроэнергетики, приведены эталонные математические модели, которые использовались в качестве приложения для программного комплекса, рассмотрен один из возможных способов повышения точности моделирования.

1. Описание пакета «Динамика»

В программно-вычислительном комплексе «Динамика» (1) используется в наиболее распространенном случае $N = 2, 3$. Алгоритмы построения полиномов Вольтерра в пакете «Динамика» направлены на идентификацию ядер Вольтерра, а также соответствующих интегралов от ядер.

В первом случае реализуется методика [10], основанная на задании физически реализуемых тестовых сигналов в виде комбинаций функций Хевисайда с амплитудами α . Это позволяет свести задачу идентификации ядер Вольтерра к решению уравнений Вольтерра I рода, допускающих явные формулы обращения. Основной недостаток данной методики заключается в том, что соответствующие многомерные интегральные уравнения Вольтерра I рода имеют решения в нужных классах функций при обременительных условиях разрешимости. В то же время для целей прогнозирования реакции системы на то или иное внешнее воздействие знание самих ядер, вообще говоря, избыточно – достаточно уметь вычислять соответствующие интегралы от ядер. Реализация второго направления основана на product integration method [11].

Построение и тестирование интегральных моделей на основе (1) апробировано для некоторых эталонных динамических систем тепло- и электроэнергетики [12]. Пакет реализован в среде Borland C++ Builder и имеет единый интерфейс для настройки входных данных, вызова и визуализации результатов расчетных модулей по следующим группам:

- 1) блок идентификации: построение интегральных моделей в случае скалярных и векторных входных сигналов для соответствующих эталонных моделей;
- 2) блок моделирования: вычисление откликов интегральных моделей при произвольных возмущениях и формирование управляемого входного сигнала, обеспечивающего желаемый (заданный) отклик интегральной модели.

2. Эталонные динамические системы

Обеспечение критериев надежности и безопасности эксплуатации энергетического оборудования, разработка и применение эффективных методов прогнозирования динамических нагрузок во время нештатных ситуаций являются ключевыми задачами перспективных энергетических технологий. В связи с этим актуальны исследования в области математического описания динамики энергетических систем. В этом разделе приведены динамические системы тепло- и электроэнергетики, на которых исследовалась возможность применения теории интегро-степенного ряда Вольтерра.

2.1. Эталонная математическая модель элемента теплообменного аппарата

Для моделирования динамики теплофизических процессов обычно используют дифференциальные уравнения в частных производных с большим числом замыкающих соотношений. В работе [13], в предположении линейности изменения пространственной переменной, модель элемента теплообменного аппарата представлена в виде объекта с сосредоточенными параметрами, который описывает система

$$\frac{d\Delta i(\tau)}{d\tau} + (a_1\Delta i(\tau) + b_1\Delta\theta(\tau))D(\tau) = g(\tau), \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta\theta(\tau)}{d\tau} + (a_2\Delta i(\tau) + b_2\Delta\theta(\tau))D(\tau) = \omega(\tau) \quad (3)$$

с начальными условиями $\Delta i(\tau)|_{\tau=0} = 0$, $\Delta\theta(\tau)|_{\tau=0} = 0$.

В (2), (3) приняты обозначения:

$$a_1 = \frac{1}{G_B} \left(1 + \frac{K_\alpha H}{c_B} \right), \quad a_2 = -\frac{K_\alpha H}{G_B c_B c_M}, \quad b_1 = -\frac{K_\alpha H}{G_B}, \quad b_2 = \frac{K_\alpha H}{G_M c_M},$$

$$g(\tau) = \frac{D(\tau)}{G_B} \left(\Delta i_{\text{вх}}(\tau) - K_\alpha H K_p \Delta p(\tau) \right), \quad K_p = -\frac{1}{c_B} \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_t,$$

$$\omega(\tau) = \frac{1}{G_M c_M} \Delta Q(\tau) - \frac{Q_0}{D_0 G_M c_M} \Delta D(\tau) + \frac{K_\alpha H K_p}{G_M c_M} D(\tau) \Delta p(\tau),$$

где τ – время, с; D – расход вещества, кг/с; $Q = q \cdot l$ – полная тепловая нагрузка, кВт; $G = g \cdot l$ – полная масса, кг; $H = h \cdot l$ – полная поверхность теплообмена, м²; l – длина рассматриваемого участка, м; i – энтальпия, кДж/кг; t , θ – температура потока вещества и стенки, К; C – удель-

ная теплоемкость, кДж/кг·К; p – давление, Н/м²; K_α – константа, связанная с коэффициентом теплоотдачи $\alpha = K_\alpha \cdot D$; Δ – приращение, например, $D(\tau) = D_0 + \Delta D(\tau)$; индексами «0» обозначены начальные параметры ($D_0 = 0,16$ кг/с, $Q_0 = 100$ кВт, $i_{\text{вх}0} = 434$ кДж/кг), «вх» – значение на входе, «В» – вещество потока, «М» – материал стенки.

Эталонная модель (2), (3) позволяет рассмотреть изменение энтальпии $\Delta i(\tau)$ при произвольных законах возмущений $\Delta D(\tau)$, $\Delta Q(\tau)$, $\Delta i_{\text{вх}}(\tau)$, $\Delta p(\tau)$. В программном комплексе «Динамика» реализованы процедуры построения квадратичного и кубичного полиномов Вольтерра для моделирования отклика $\Delta i(\tau)$ динамической системы в случае, когда вектор входных сигналов состоит из двух компонент:

1. $\Delta D(\tau)$, $\Delta Q(\tau)$ (в предположении, что $\Delta i_{\text{вх}}(\tau) = 0$, $\Delta p(\tau) = 0$). Тогда эталонным откликом $\Delta i(\tau)$ является

$$\Delta i(\tau) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_0^\tau \left(\Delta Q(\eta) - \frac{Q_0}{D_0} \Delta D(\eta) \right) \begin{pmatrix} e^{-\lambda_1 \int_0^\eta D(\zeta) d\zeta} & -\lambda_2 \int_0^\eta D(\zeta) d\zeta \\ e^{-\lambda_2 \int_0^\eta D(\zeta) d\zeta} & -\lambda_1 \int_0^\eta D(\zeta) d\zeta \end{pmatrix} d\eta; \quad (4)$$

2. $\Delta i_{\text{вх}}(\tau)$, $\Delta Q(\tau)$ (в предположении, что $\Delta D(\tau) = 0$, $\Delta p(\tau) = 0$). В этом случае $\Delta i(\tau)$ описывается зависимостью

$$\begin{aligned} \Delta i(\tau) = & \frac{Q_0 \lambda_1 \lambda_2}{D_0 (\lambda_2 - \lambda_1)} \int_0^\tau \Delta D(\eta) \begin{pmatrix} e^{-\lambda_1 \int_0^\eta D(\zeta) d\zeta} & -\lambda_2 \int_0^\eta D(\zeta) d\zeta \\ e^{-\lambda_2 \int_0^\eta D(\zeta) d\zeta} & -\lambda_1 \int_0^\eta D(\zeta) d\zeta \end{pmatrix} d\eta + \\ & + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{G_B (\lambda_1 - \lambda_2)} \int_0^\tau D(\eta) \Delta i_{\text{вх}}(\eta) \begin{pmatrix} \gamma_1 e^{-\lambda_1 \int_0^\eta D(\zeta) d\zeta} & -\lambda_2 \int_0^\eta D(\zeta) d\zeta \\ \gamma_2 e^{-\lambda_2 \int_0^\eta D(\zeta) d\zeta} & -\lambda_1 \int_0^\eta D(\zeta) d\zeta \end{pmatrix} d\eta. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь γ_1 , γ_2 – константы; λ_1 , λ_2 – корни характеристического уравнения для системы (2), (3).

Построение откликов интегральных моделей выполняется на равномерной сетке с шагом $h = 1$ (с). Такой выбор шага связан с реальными данными, полученными в ходе эксперимента на высокотемпературном контуре Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Формулы (4), (5) применяются для получения необходимого набора откликов объекта на обучающие сигналы.

2.2. Эталонная математическая модель ветроэнергетической установки

Согласно [14–16], математическая модель ветроэнергетической установки с горизонтальной осью вращения представима в следующем виде:

$$\frac{d\omega_T}{d\tau} = \frac{\rho S C_p(\tau) V^3(\tau)}{2\omega_T(\tau) J} - \frac{M_C(\tau)}{J}, \quad \omega_T(0) = \omega_{T_0}, \quad (6)$$

$$C_p(\tau) = 0,22 \left(\frac{116}{z(\tau)} - 0,4b(\tau) + 5 \right) e^{-\frac{12,5}{z(\tau)}}, \quad (7)$$

$$z(\tau) = \left(\frac{V(\tau)}{\omega_T(\tau) R + 0,08b(\tau) V(\tau)} - \frac{0,035}{b^3(\tau) + 1} \right)^{-1},$$

где ω_T – угловая скорость вращения элементов ветроустановки, рад/с; ω_{T_0} – начальное значение угловой скорости вращения, рад/с; M_C – момент сопротивления нагрузки, Н·м; J – момент инерции движущихся частей ветровой турбины, кг·м²; ρ – плотность воздуха, кг/м³; S – ометаемая площадь, м²; R – радиус ветроколеса, м; b – угол наклона лопастей по нормали от направ-

ления ветра, град; V – скорость ветра, м/с; безразмерные величины: C_p – коэффициент использования энергии ветра, z – быстроходность.

Разностная аппроксимация отклика $\Delta\omega_T(\tau) = \omega_T(\tau) - \omega_{T_0}$ системы (6), (7) на входные воздействия $\Delta b(\tau) = b(\tau) - b_0$ и $\Delta V(\tau) = V(\tau) - V_0$ реализована с помощью метода Рунге – Кутты 4-го порядка в среде MATLAB. На рис. 1 представлена конструктивная схема объекта и пример обучающих входных сигналов, используемых для построения квадратичного полинома Вольтерра.

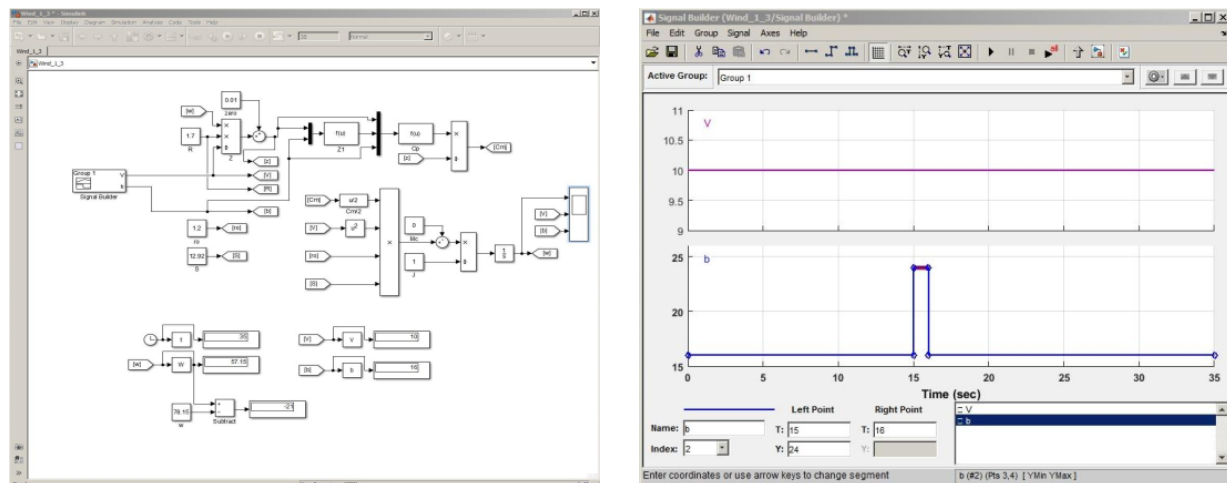


Рис. 1. Эмуляция эталонной модели (6), (7) в среде MATLAB

3. Этапы моделирования отклика объекта

Механизм вывода отклика \hat{y} на входной сигнал $x = (x_1, x_2)^T$ для моделирования реакции y_{et} эталонных динамических систем подробно описан в [17] на примере квадратичного полинома Вольтерра. Условно его можно разделить на несколько этапов:

Этап I. Вычисляем значения отклика эталонного объекта на обучающие входные воздействия. Используем наборы входных сигналов в виде комбинаций функций Хевисайда.

Этап II. Проводим процедуру декомпозиции отклика объекта на составляющие, обусловленные влиянием каждого из компонент входного сигнала x_1, x_2 .

Этап III. Находим разностные аппроксимации ядер Вольтерра (либо соответствующих интегралов от них).

Этап IV. С помощью метода средних прямоугольников (либо product integration method) вычисляем для произвольных входных возмущений итоговое значение \hat{y} .

Этап V. Формируем управляющий сигнал $u \equiv x_1$ для стабилизации желаемого значения $\hat{y}^* = 0$ при возмущающем воздействии x_2 .

Этапы I–III решают задачу идентификации и выполняются для настройки переходных характеристик на заданные параметры режима работы объекта.

Пример выполнения этапа IV для эталонной модели (4) приведен на рис. 2: графики входных возмущений расхода жидкости $\Delta D(\tau)$ и теплоподвода $\Delta Q(\tau)$, а также результаты моделирования энтальпии $\Delta i(\tau)$ по эталонной модели (I) и интегральным моделям (II, III) на заданные входные сигналы.

Задача, описанная на этапе V, применительно к (1) приводит к необходимости решения полиномиального уравнения Вольтерра I рода относительно x_1 . Основная специфика таких уравнений связана с локальностью области существования непрерывных решений [18]. На рис. 3 представлен пример выполнения V этапа моделирования. Видно, что в конце переходного процесса $T = 30$ (с) расчетное значение $\Delta i(\tau)$, которое определяется соответствующими входными сигналами $\Delta D(\tau)$ и $\Delta Q(\tau)$, равно нулю.

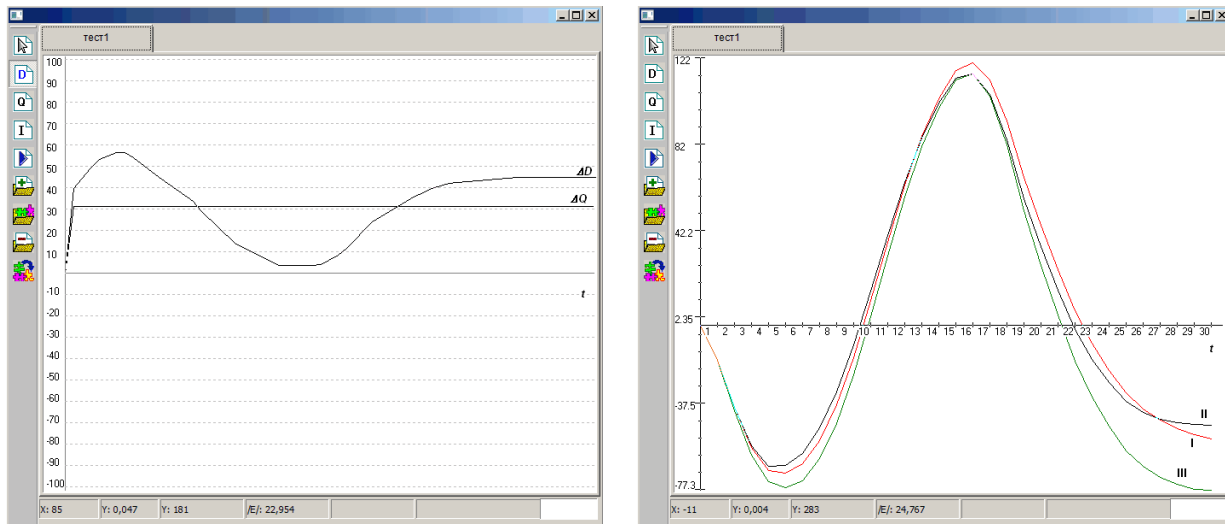


Рис. 2. Задание входных сигналов $\Delta D(\tau)$, $\Delta Q(\tau)$ и вывод результатов моделирования $\Delta i(\tau)$

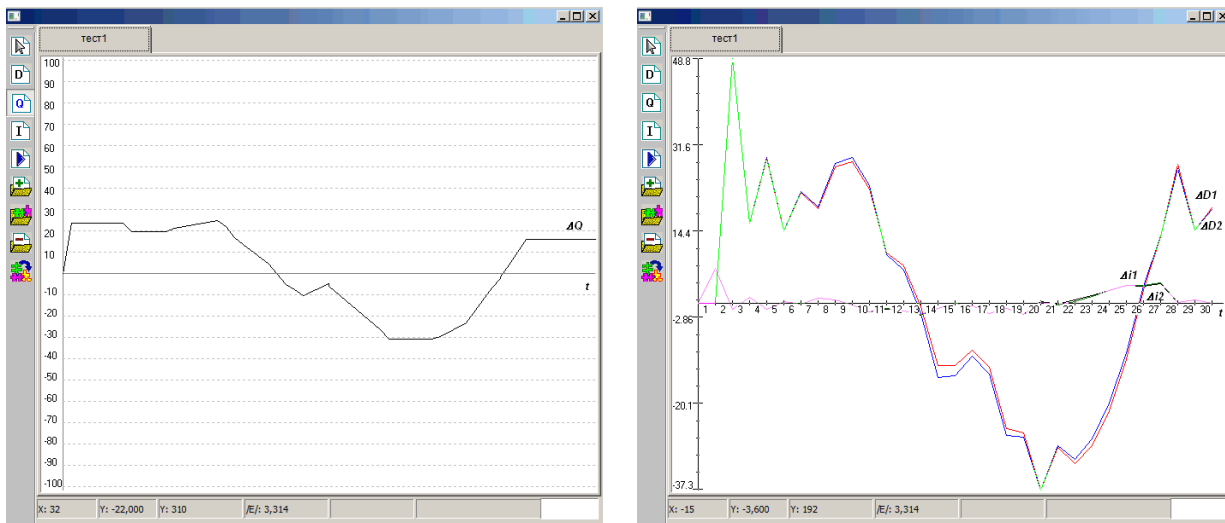


Рис. 3. Задание возмущающего воздействия $\Delta Q(\tau)$ и вывод управляющего сигнала $\Delta D(\tau)$

4. Повышение точности моделирования

Верификация алгоритмов, реализованных в пакете «Динамика», выполнена на эталонной динамической системе

$$y_{et}(\tau) = \sum_{m=1}^N \frac{1}{m!} \left(\int_0^{\tau} x(s) ds \right)^m \tag{8}$$

В данном разделе на примере (8) иллюстрируется эффект повышения точности моделирования за счет использования нестационарной модели

$$y_1(\tau) = \int_0^{\tau} K_1(\tau, s_1) x(s_1) ds_1 + \iint_{00}^{\tau\tau} K_2(\tau, s_1, s_2) \prod_{i=1}^2 x(s_i) ds_i \tag{9}$$

и комбинированной модели

$$y_2(\tau) = \int_0^{\tau} K_1(\tau, s_1) x(s_1) ds_1 + \iint_{00}^{\tau\tau} \hat{K}_2(s_1, s_2) \prod_{i=1}^2 x(\tau - s_i) ds_i, \tag{10}$$

полученной путем замены стационарного линейного слагаемого из

$$y_3(\tau) = \int_0^{\tau} \hat{K}_1(s_1)x(\tau-s_1)ds_1 + \int_0^{\tau} \int_0^{\tau} \hat{K}_2(s_1, s_2) \prod_{i=1}^2 x(\tau-s_i)ds_i \quad (11)$$

на нестационарное.

В качестве критерия точности моделирования выберем значения невязок при $\tau = T$ между откликами $y_{et}^{\beta}(\tau)$ и $y_j^{\beta}(\tau), j = \overline{1,3}$, на входные сигналы с амплитудами $0,01 \leq \beta \leq B \cdot 0,01; B = 25$:

$$\varepsilon_j = \frac{1}{B} \sum_{\beta=1}^B |y_{et}^{\beta}(T) - y_j^{\beta}(T)|, \quad \Delta_j = \frac{1}{B} \sum_{\beta=1}^B \frac{|y_{et}^{\beta}(T) - y_j^{\beta}(T)|}{y_{et}^{\beta}(T)} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Предположим, что в модели (8) $N = 3$. Ядра Вольтерра в моделях (10), (11) соответственно равны:

$$K_1(\tau, \omega) = 1 + \frac{1}{2} \alpha^2 \omega^2, \quad \hat{K}_1(\tau) = 1 + \frac{1}{2} \alpha^2 \tau^2, \quad \hat{K}_2 = \frac{1}{2}.$$

В качестве допустимого считаем множество $X = (B, T)$ входных сигналов вида

$$x_{\omega}^{\beta}(\tau) = \beta(I(\tau) - I(\tau - \omega)). \quad (13)$$

Для сравнения эффективности применения (10) и (11) были получены значения невязок (12) с точностью $\delta = 10^{-5}$ для $1 \leq \omega \leq 29, T = 30$ (рис. 4).

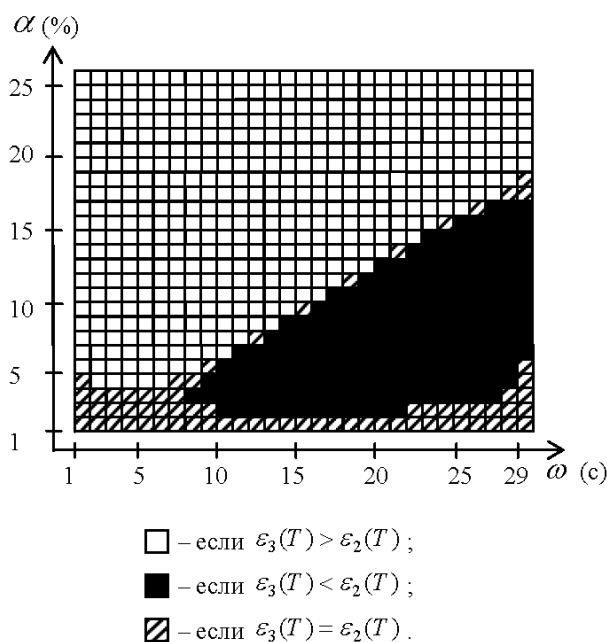


Рис. 4. Результаты вычислительных экспериментов для сигналов (13)

Максимальные значения невязок (12) при $j = 2, 3$ соответственно равны:

$$\varepsilon_{2\max} = 0,0006, \quad \Delta_{2\max} = 0,60\%,$$

$$\varepsilon_{3\max} = 0,0011, \quad \Delta_{3\max} = 3,01\%.$$

Предположим далее, что в (8) $N = 4$. Тогда ядра Вольтерра в моделях (9)–(11) соответственно равны:

$$K_1(\tau, \omega_1) = 1 + \frac{\alpha^2}{2} \omega_1^2, \quad K_2(\tau, \omega_1, \omega_1 + \omega_2) = \frac{1}{2} + \frac{\alpha^2}{4} (\omega_1 - \omega_2)^2,$$

$$\hat{K}_1(\tau) = 1 + \frac{1}{2} \alpha^2 \tau^2, \quad \hat{K}_2(\tau, \tau - \omega_1) = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \alpha^2 \omega_1^2.$$

В качестве допустимого выберем множество $X = (B, T)$ входных сигналов вида

$$x_{\omega}^{\beta}(\tau) = \beta(I(\tau) - 2(I(\tau - 2\omega) - I(\tau - \omega)) + I(\tau - T)), \quad (14)$$

где $0 \leq 2\omega \leq \tau \leq T$. На рис. 5 выделена область применимости исследуемых интегральных моделей.

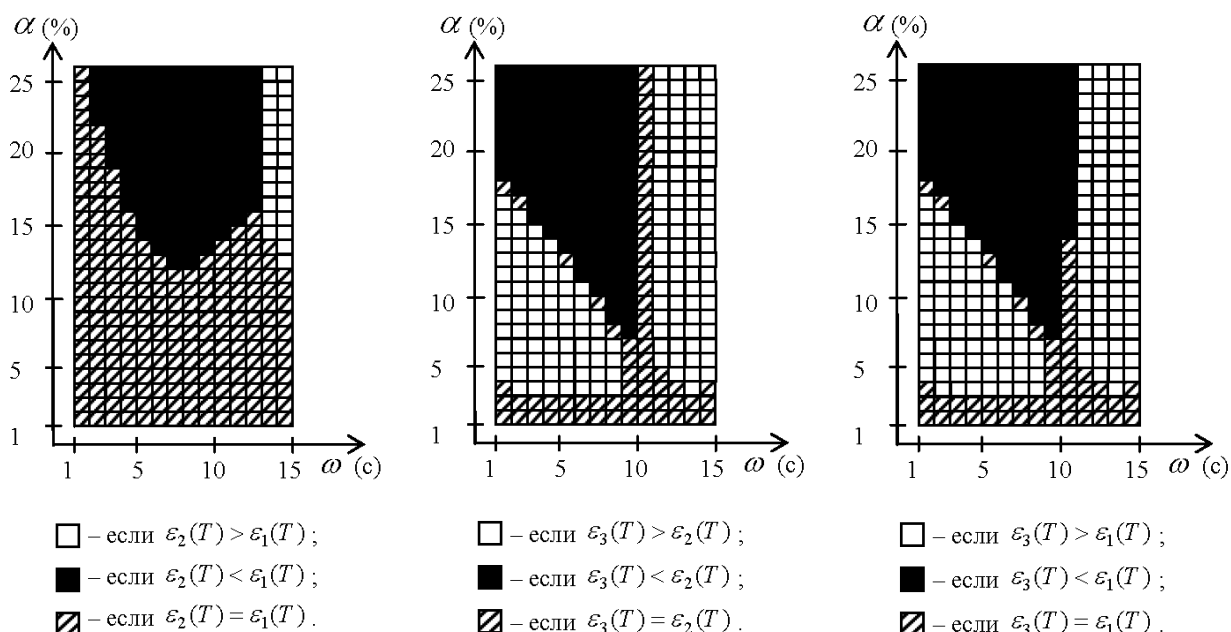


Рис. 5. Результаты вычислительных экспериментов для сигналов (14)

Максимальные значения невязок ε_j и Δ_j при $j = \overline{1,3}$ соответственно равны:

$$\varepsilon_{1\max} = 0,0011; \Delta_{1\max} = 6,55 \%,$$

$$\varepsilon_{2\max} = 0,0011; \Delta_{2\max} = 6,78 \%,$$

$$\varepsilon_{3\max} = 0,0009; \Delta_{3\max} = 10,64 \%.$$

Вычислительный эксперимент показал, что применение моделей вида (9), (10) с нестационарными составляющими является более эффективным даже в случае, когда эталонный динамический объект не обладает свойством нестационарности.

Заключение

В работе описан авторский программно-вычислительный комплекс для моделирования динамической системы типа «вход-выход». На эталонной математической модели проиллюстрирован эффект повышения точности моделирования. Дальнейшее развитие работы связано с получением областей применимости нестационарных интегральных моделей для описания динамики исследуемых энергетических систем.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ №15-01-01425-а.

Литература

1. Цыпкин, Я.З. Основы теории автоматических систем / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1977. – 560 с.
2. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
3. Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем / Ю.С. Попков, О.Н. Киселев, Н.П. Петров, Б.Л. Шмульян. – М.: Энергия, 1976. – 440 с.
4. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Теория нестационарных, нелинейных и самонастраивающихся систем автоматического регулирования / под ред. В.В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1969. – 368 с.

5. Volterra, V. *A Theory of Functionals, Integral and Integro-Differential Equations* / V. Volterra. – New York: Dover Publ., 1959.

6. Информационная технология диагностирования состояний электродвигателей на основе моделей Вольтерра / С.Н. Григоренко, С.В. Павленко, В.Д. Павленко, А.А. Фомин // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2014. – Т. 4, № 11 (70), – С. 38–43.

7. Метод и информационная технология построения непараметрической динамической модели глазо-двигательного аппарата / А.А. Фомин, М.М. Масри, В.Д. Павленко, А.Н. Фёдорова // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – Т. 2, № 9 (74). – С. 64–69.

8. Govind, G. *Multilayered Neural Networks and Volterra Series: The Missing Link* / G. Govind, P.A. Ramamoorthy // *IEEE International Conference on Systems Engineering*. – 1990. – Vol. 1. – P. 633–636. DOI: 10.1109/ICSYSE.1990.203237

9. Towards a Volterra series representation from a Neural Network model / G. Stegmayer, M. Pirola, G. Orenzo, O. Chiotti // *WSEAS Transactions on Systems*. – 2004. – Vol. 3. – P. 432–437.

10. Apartsyn, A.S. *Nonclassical linear Volterra equations of the first kind* / A.S. Apartsyn. – Boston: VSP Utrecht, 2003. – 193 p. DOI: 10.1515/9783110944976

11. Linz P. *Product Integration Method for Volterra Integral Equations of the First Kind* / P. Linz // *BIT*. – 1971. – Vol. 11. – P. – 314–421. DOI: 10.1007/BF01939410

12. Солодуша, С.В. Программный комплекс для моделирования систем тепло- и электроэнергетики / С.В. Солодуша // *Труды XVI Междунар. конф. «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM–2016)»*. – М.: ООО «Аналитик», 2016. – С. 314–318.

13. Тауров Э.А. Нелинейное моделирование динамики теплообмена в канале с однофазным теплоносителем / Э.А. Тауров // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*. – 1989. – № 1. – С. 150–156.

14. Пронин, Н.В. Модель ветрогенератора ВЭУ-3 в пакете MATLAB / Н.В. Пронин, А.С. Мартыанов // *Вестник ЮУрГУ. Энергетика*. – 2012. – № 37 (296). – С. 143–145.

15. Perdana, A. *Dynamic Response of Grid-Connected Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator during Disturbances* / A. Perdana, O. Carlson, J. Persson // *Proc. IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics*. – 2004. – http://www.elkraft.ntnu.no/norpie/10956873/Final%20Papers/054%20-%20Abram_DynamicResponseDFIG.PDF

16. Sedaghat, A. *Aerodynamic design of a 300 kW horizontal axis wind turbine for province of Semnan* / A. Sedaghat, M. Mirhosseini // *Energy Conversion and Management*. – 2012. – Vol. 63. – P. 87–94. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.01.033

17. Solodusha, S.V. *Applicability of Volterra integral polynomials in the control systems of electric power facilities* / S.V. Solodusha, K.V. Suslov, D.O. Gerasimov // *Proc. International Conference Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems (Pyatnitskiy's Conference 2016)*. – IEEE, 2016. – P. 7541227. DOI: 10.1109/stab.2016.7541227

18. Апарцин, А.С. Полилинейные уравнения Вольтерра I рода и некоторые задачи управления / А.С. Апарцин // *Автоматика и телемеханика*. – 2008. – № 4. – С. 3–16. DOI: 10.1134/S0005117908040012

Солодуша Светлана Витальевна, канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. лабораторией неустойчивых задач вычислительной математики, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск; solodusha@isem.irk.ru.

Поступила в редакцию 23 марта 2017 г.

SOFTWARE PACKAGE “DYNAMICS” FOR STUDYING DYNAMIC PROCESSES BY VOLTERRA SERIES

S.V. Solodusha, solodusha@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

This paper presents the software package “Dynamics”, designed for identification and modeling of nonlinear dynamic systems such as “input-output”. Computational modules include units of identification, modeling and adaptive control. Identification algorithms are based on using the responses of reference systems to physically realizable learning input signals. The mathematical models of an element of heat-transfer device and a wind power plant with a horizontal axis of rotation are considered as reference standards. The results of calculations illustrate the increase in modeling accuracy due to a more complete information about the system responses to test signals.

Keywords: nonlinear dynamic system, Volterra polynomial, identification, automatic control.

References

1. Tsyppkin Ya.Z. *Osnovy teorii avtomaticheskikh sistem* [Fundamentals of the Automatic Systems Theory]. Moscow, Nauka, 1977. 560 p.
2. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Reference Book on the Theory of Automatic Control]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 712 p.
3. Popkov Yu.S., Kiselev O.N., Petrov N.P., Shmul'yan B.L. *Identifikatsiya i optimizatsiya nelineynykh stokhasticheskikh sistem* [Identification and Optimization of Nonlinear Stochastic Systems]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 440 p.
4. *Tekhnicheskaya kibernetika. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya. Teoriya nestatsionarnykh, nelineynykh i samonastrayvayushchikhsya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Technical Cybernetics. Theory of Automatic Control. Theory of Nonstationary, Nonlinear and Self-Adjusting Automatic Control Systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 368 p.
5. Volterra V. *A Theory of Functionals, Integral and Integro-Differential Equations*. New York, Dover Publ., 1959. 288 p.
6. Grigorenko S.N., Pavlenko S.V., Pavlenko V.D., Fomin A.A. [Information Technology for Diagnosing the States of Electric Motors Based on Volterra Models]. *Eastern European Journal of Advanced Technology*, 2014, vol. 4, no. 11 (70), pp. 38–43. (in Russ.)
7. Fomin A.A., Masri M.M., Pavlenko V.D., Fjodorova A.N. [Method and Information Technology for Constructing a Non-Parametric Dynamic Model of the Eye-Movement Apparatus]. *Eastern European Journal of Advanced Technology*, 2015, vol. 2, no. 9 (74), pp. 64–69. (in Russ.)
8. Govind G., Ramamoorthy P.A. Multilayered Neural Networks and Volterra Series: The Missing Link. *IEEE International Conference on Systems Engineering*, 1990, vol. 1, pp. 633–636. DOI: 10.1109/ICSYSE.1990.203237
9. Stegmayer G., Pirola M., Orengo G., Chiotti O. Towards a Volterra Series Representation from a Neural Network Model. *WSEAS Transactions on Systems*, 2004, vol. 3, pp. 432–437.
10. Apartsyn A.S. *Nonclassical Linear Volterra Equations of the First Kind*. Boston, VSP Utrecht, 2003. 193 p. DOI: 10.1515/9783110944976
11. Linz P. Product Integration Method for Volterra Integral Equations of the First Kind. *BIT*, 1971, vol. 11, pp. 314–421. DOI: 10.1007/BF01939410
12. Solodusha S.V. [Software for Modeling Heat and Electric Power Systems]. *Proceedings of the 16th International Youth Conference “CAD/CAM/PDM-2016”*. Moscow, Ltd “Analitik”, 2016, pp. 314–318. (in Russ.)
13. Tairov E.A. [Nonlinear Modeling of Heat Exchange Dynamics in a Duct with One-Phase Heat Carrier]. *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Ser. Energy and Transport*, 1989, no. 1, pp. 150–156. (in Russ.)

14. Pronin N.V., Martyanov A.S. [Model of Wind Turbine ВЭУ-3 in the Package MATLAB]. *Bulletin of the South Ural State University. Series Power Engineering*, 2012, no. 37 (296), pp. 143–145. (in Russ.)
15. Perdana A., Carlson O, and Persson J. Dynamic Response of Grid-Connected Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator during Disturbances. *IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics*. 2004. Available at: http://www.elkraft.ntnu.no/norpie/10956873/Final%20Papers/054%20-%20Abram_DynamicResponseDFIG.PDF
16. Sedaghat A., Mirhosseini M. Aerodynamic Design of a 300 kW Horizontal Axis Wind Turbine for Province of Semnan. *Energy Conversion and Management*, 2012, vol. 63, pp. 87–94. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.01.033
17. Solodusha S.V., Suslov K.V., Gerasimov D.O. Applicability of Volterra Integral Polynomials in the Control Systems of Electric Power Facilities. *International Conference Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems (Pyatnitskiy's Conference 2016)*. IEEE, 2016, p. 7541227. DOI: 10.1109/stab.2016.7541227
18. Apartsyn A.S. Multilinear Volterra Equations of the first Kind and Some Problems of Control. *Automation and Remote Control*, 2008, vol. 69, no. 4. pp. 545–558. DOI: 10.1134/S0005117908040012

Received 23 March 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Солодуша, С.В. Пакет «Динамика» для исследования динамических процессов рядами Вольтерра / С.В. Солодуша // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 83–92. DOI: 10.14529/ctcr170207

FOR CITATION

Solodusha S.V. Software Package “Dynamics” for Studying Dynamic Processes by Volterra Series. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 83–92. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr170207
